

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический

Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Газодинамический анализ течения в области фронта лесного пожара</b>

УДК 630.43:662.612

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Г	Плюта Наталья Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Борисов Борис Владимирович	д.ф-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Василевский М.В.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Теоретической и промышленной теплотехники	Кузнецов Г.В.	д.ф-м.н.		

Томск – 2016

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ**  
Направление подготовки **Теплоэнергетика и теплотехника**  
Кафедра **Теоретической и промышленной теплотехники**

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
\_\_\_\_\_ Кузнецов Г.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группы	ФИО
5БМ4Г	Плюта Наталье Сергеевне

Тема работы:

**Газодинамический анализ течения в области фронта лесного пожара**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№10155/с от 28.12.2015

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2016 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Объектом исследования является: фронт лесного пожара

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p><i>Газодинамический анализ в области фронта лесного пожара.</i> <i>Численное исследование процесса теплообмена в области фронта лесного пожара.</i> <i>Анализ полученных результатов численного исследования процесса теплообмена в области фронта лесного пожара.</i></p>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	<b>Попова Светлана Николаевна</b>
«Социальная ответственность»	<b>Василевский Михаил Викторович</b>
«Раздел на английском языке»	<b>Буран Анна Леонидовна</b> <b>Крайнов Александр Валерьевич</b>

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Введение
Современное состояние моделирования процессов теплообмена в области фронта лесного пожара
Математическое моделирование процессов теплообмена в области фронта лесного пожара
Численная реализация математической модели
Моделирование газодинамических параметров в области очага горения
Заключение
Список используемой литературы

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	23.09.2014г.
---	--------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Борисов Борис Владимирович	д.ф-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Г	Плюта Наталья Сергеевна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает 112 страниц, 25 рисунков, 10 таблиц, 64 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: скорость фронта лесного пожара, численное моделирование, тепломассообмен.

Объектом исследования является фронт лесного пожара.

Целью работы является газодинамический анализ течения в области фронта лесного пожара.

В процессе исследования проводилось математическое моделирование.

В результате исследования разработан программный комплекс.

Область применения: определение скорости распространения фронта лесного пожара.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord 2010, и редакторе формул MathType, для расчетов и выполнения графиков использовались программы Delphi 7, OriginPro9.1, CorelDrawX3, MicrosoftExcel 2010.

## Содержание

Введение.....	10
1 Современное состояние моделирования процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара .....	12
1.1 Области применения процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара.....	12
1.2 Моделирование процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара .....	19
1.3 Численные методы.....	20
2 Математическое моделирование процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара.....	26
2.1 Физическая постановка задачи .....	26
3 Численная реализация математической модели.....	31
3.1 Особенности реализации математической модели .....	31
3.2 Выбор численного метода расчета (Метод К.С. Годунова) .....	32
4 Моделирование газодинамических параметров в области очага горения....	38
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	51
5.1 Оценка инновационного потенциала НИР .....	51
5.2 Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика.....	52
5.3 Составление сметы затрат.....	58
5.4 Расчет нарастания технической готовности работ.....	64
6. 1. Профессиональная социальная безопасность.....	67
6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов при разработке проектного решения.....	67
6.1.1.1 Воздействие электромагнитного поля на оператора ПЭВМ.....	68
6.1.1.2 Освещение .....	71
6.1.1.3 Микроклимат помещения .....	73
6.1.1.4 Источники шума.....	75
6.1.1.5 Электробезопасность при работе на ПЭВМ .....	75
6.1.1.6 Пожарная безопасность.....	76
6.1.1.7 Региональная безопасность.....	78

6.1.2 Анализ вредных и опасных факторов объекта исследования .....	79
6.2 Экологическая безопасность.....	81
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	83
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	85
6.5 Выводы.....	87
Заключение .....	89
Список использованных источников .....	90
Приложение А .....	96

## Введение

Лесные пожары относятся к числу стихийных бедствий, наносящих значительные материальные и экологические потери.

Для более эффективной борьбы с лесными пожарами необходимо решать две задачи: 1) анализ причин пожароопасных состояний лесов, с тем чтобы не допускать возникновения возгораний; 2) определить с какой скоростью и в каком направлении будет двигаться фронт пожара, для оптимального выбора тактики борьбы с ним. Данное исследование сосредоточено на решении второй задачи. Предполагается на основе газодинамического анализа течения в области фронта лесного пожара, исследовать перемещение данного фронта. В связи с этим была поставлена цель, представленная на слайде.

Цель работы заключается в газодинамическом анализе течения в области фронта лесного пожара.

Научная новизна работы заключается в формулировании математической модели гидродинамики течения газовой смеси при движении газового потока в области фронта лесного пожара. Исследованы течения в области высокой температуры, проанализированы влияние ветра на формирование и величину рециркуляционных областей вблизи термика.

Практическая значимость заключается в том, что впоследствии данный продукт может быть использован для формирования численных значений тепловых потоков, участвующих в процессе воспламенения не загоревшихся областей, и непосредственно для определения скорости распространения фронта лесного пожара.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий».

Публикации. Основные результаты диссертации в виде тезисов размещены на сайте конференции и приняты для опубликования в сборнике трудов вышеназванной конференции.

Содержание работы.

Первая глава отражает современные тенденции в области моделирования процессов в области фронта лесного пожара.

Вторая глава посвящена созданию математической модели процессов теплообмена с учетом конвекции и газодинамических характеристик. Представлены физическая и математическая постановки задачи.

В третьей главе рассмотрены особенности численной реализации математической модели. Проводится анализ используемого численного метода и применение его непосредственного для решения полученной системы уравнений.

В четвертой главе проведено исследование газодинамических параметров в области фронта лесного пожара. Проанализированы особенности моделирования параметров течения газовой смеси в данной области.

В заключении подведены основные итоги проведенных исследований.



# **1 Современное состояние моделирования процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара**

## **1.1 Области применения процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара**

Лесные пожары относятся к числу стихийных бедствий, наносящих значительный материальный и экологический вред. Существуют различные формулировки понятия лесного пожара. Одно из простых определений лесного пожара обычно называется неуправляемое многостадийное горение на покрытой лесом площади [1]. Более сложное определение: лесные пожары это чрезвычайно сложные и разрушительные природные явления, возникновение и развитие, которых зависят от запаса и влагосодержания лесных горючих материалов, метеорологических условий, рельефа местности и других факторов [2]. О классификации пожаров было опубликовано много статей и учебных изданий.

Классификация лесных пожаров в зависимости от поставленных задач, формулируется по-разному.

Лесные пожары классифицируется по следующим признакам [3]:

- 1) действию огня на составные части насаждения;
- 2) характеру объекта пожара;
- 3) повторяемости пожара;
- 4) сезону и времени суток;
- 5) масштабу охватываемой территории;
- 6) причинам возникновения пожара;
- 7) особенностям процессов изменений после пожара и т.д.

Основанная на данном принципе классификация лесных пожаров, имеет огромное практическое значение: на нем формируется непосредственная борьба с пожарами, а также играет важную роль в пожарной статистике. Выше представленную классификацию применяют и для анализа изменений в лесу

после пожаров. По существу, здесь идет речь об основной классификации лесных пожаров.

По характеру возгорания и составу леса лесные пожары классифицируются на низовые, верховые и почвенные [4].

Для низового пожара характерно вытянутое очертание пожара с неровной кромкой, дымом светло-серого цвета. Скорость распространения низовых пожаров по ветру в 6-10 раз больше, чем против ветра. Скорость распространения такого пожара составляет около 0,25-5 км/ч. Наибольшую скорость распространения лесной пожар достигает днем. При изменении погодных условий, а также скорости и направления ветра, определить форму пожара становится сложнее. При таких обстоятельствах, особенно в случаях, когда лесной пожар принял значительные размеры, имеет место окружение огнем людей. При низовом пожаре уничтожается подстилка, напочвенный покров, травы, ветки и сучья, опавшие на землю и т. д. Высота пламени лесного пожара составляет 2,5 м, а температура горения достигает примерно 700 °С [4].

При верховом пожаре, в отличие от низового, горят как кроны деревьев, так и подстилка и напочвенный покров. Верховой пожар является следующей стадией развития низового. Особенность верхового пожара заключается в том, что его неотъемлемой частью является низовой пожар. На полог древостоя низовой пожар переходит в растительности с опущенными низко кронами, в разновозрастных хвойных насаждениях, при обильном подросте. Возникновение верховых пожаров наблюдается обычно при засухе и ветре со средней и большой скорости ветра.

По скорости распространения лесные пожары подразделяются на беглые и устойчивые.

В засуху и при сильном ветре обычно возникают беглые верховые пожары. Огонь обычно распространяется по пологу скачками, иногда значительно опережая фронт низового пожара. Вследствие выделения тепла от низового пожара происходит нагревание полога.

При ветре со скоростью 15-25 м/с распространяются беглые верховые пожары. Скорость движения фронта лесного пожара составляет 4-5,5 м/с. Продолжительность такого горения около 15-25 с, пламя распространяется вперед на 70-90 м от низового пожара, и потом горение крон прекращается до момента подхода кромки низового огня. Поэтому скорость продвижения верхового беглого пожара в среднем составляет 0,5-0,7 м/с, а при продолжительности 10 часов жаркого дневного времени - 20...24 км.

Устойчивые верховые пожары также называют повальными, так как при верховом устойчивом пожаре огонь по кронам распространяется по мере продвижения кромки устойчивого низового пожара. При таком пожаре воздействию огня подвергается лесная подстилка, почвенный покров, сухостой, подлесок, ветки, сучья, также стволы деревьев обгорают [3].

В работе [5] представлена классификация лесных пожаров по интенсивности горения. Подразделяют на слабые, средние и сильные пожары, которым характерны определенные интервалы мощности тепловыделения с единицы площади. Предложенная характеристика зависит от некоторых параметров: тип леса, вид и запас горючего материала, длительность периода сушки, текущие метеорологические условия и т.д. Данная характеристика сильно изменяется для реального процесса горения в лесу. Эти критерии определяют уровень пожарной опасности по условиям погоды и уровень природной пожарной опасности лесных территорий.

Наиболее полная классификация представлена И.С. Мелехова (1947).

Таблица 1.1 – Классификация лесных пожаров И.С. Мелехова (1947)

1. Низовые пожары	2. Верховые пожары	3. Подземные пожары
1	2	3
Подстилично-гумусовые: 1) устойчивые Напочвенные:	Вершинные: 1) устойчивые, 2) беглые	Торфяные: 1) устойчивые

Окончание таблицы 1.1

1	2	3
2) устойчивые, 3) беглые Подлесно-кустарниковые: 1) устойчивые, 2) беглые Валежные и пневы: 1) устойчивые, 2) беглые	Повальные: 1) устойчивые, 2) беглые Стволовые: 1) устойчивые	

В результате неосторожного обращения с огнем возникает около 90% лесных пожаров, а до 10% от погодных условий (сухих гроз). Лесному хозяйству наносится большой ущерб, так как сгорает большое количество древесины, прирост деревьев значительно уменьшается, изменяется состав лесов, возникают буреломы и ветровалы.

В связи с этим, проводится много научных исследований по возникновению, развитию и распространению лесных пожаров.

Однако большое внимание уделяется прогнозированию возникновения лесных пожаров.

В работе [6] рассматривается концептуальный проект создания веб-ориентированной геоинформационной системы прогноза лесной пожарной опасности. Проведено пред проектное исследование, которое показало значительное научное и технологическое отставание методик, применяемых на территории СНГ, от европейской и североамериканских систем прогноза лесной пожарной опасности. Предложена модель дифференцированной оценки лесной пожарной опасности по антропогенным и природным причинам. Рассматриваются проектные и технологические особенности реализации геоинформационной системы для визуализации посредством всемирной сети Интернет.

В работе [7] представлен проект по созданию системы прогноза лесной пожароопасности для территории Российской Федерации. Предложено объединение в единый аппаратно-программный комплекс подсистем сбора, хранения и обработки информации. Детерминированно-вероятностная методика прогноза лесной пожарной опасности предлагается в качестве математического обеспечения для реализации программы.

В работе [8] приведен небольшой обзор работ по проблеме лесных и степных пожаров. Также рассмотрена задача о зажигании деревянной стены фронтом пожара и приведено приближенное аналитическое решение данной задачи. Представлена программа исследований перехода лесных и степных пожаров на деревянные постройки, города, поселки.

В работе [9] предложен новый подход к оценке качества прогнозирования возникновения лесных пожаров с помощью искусственных нейронных сетей. Для реализации алгоритма необходимо применение многопроцессорной техники.

В работе [10] проводилось исследование по возникновению лесных пожаров в Воронежской области. За основу взято имитационное моделирование, в котором задействованы географические информационные технологии. Применялась экстраполяция временного ряда для прогнозирования возникновения пожаров. Модель экспоненциального сглаживания использовалась при построении краткосрочного прогноза.

В работе [11] с помощью нейросетевых технологий и данных результатов посредство космического мониторинга лесов рассмотрена методика оценки динамики и прогнозирования характеристик крупных лесных пожаров.

В работе [12] для прогнозирования лесопожарной обстановки совершенствования системы мониторинга обоснована эффективность применения географических информационных технологий. Рассмотрен алгоритм восстановления метеорологической обстановки на территории конкретного квартала лесного фонда Воронежской области на момент возникновения пожара. Проведен анализ показателей и критериев,

используемых при оценке возможной лесопожарной обстановки на территории Воронежской области. Рассмотрено построение информационно-аналитической системы мониторинга и прогнозирования лесопожарной обстановки на основе использования базовых пространственных данных.

В работе [13] представлены теоретические исследования процессов возникновения и распространения верховых лесных пожаров. Лес представлен как многокомпонентная многофазная реагирующая пористая среда. Для турбулентного течения, учитывая химические реакции, решены численно уравнения Рейнольдса. Применен метод контрольного объема, с помощью которого получен дискретный аналог. На основе результатов численных расчетов представлены концентрации кислорода, поле температуры и скорости, летучих продуктов пиролиза, горения и объемных долей конденсированной фазы в различные моменты времени. Данная модель дала возможность в динамике получить контуры распространения верховых лесных пожаров. Данные контуры зависят от характера и состояния лесного полога, под которым подразумеваются запас и вид лесных горючих материалов, влагосодержания, неоднородностей в лесном массиве, скорости и направления ветра и т. д.

В работе [1] рассматриваются особенности модельного описания распространения лесных пожаров от очага их возникновения вместе с формированием изображений природно-техногенных объектов (водоемов, дорожно-транспортных сетей, лесных экосистем), охваченных дымами разной интенсивности, по данным их гиперспектрального аэрозондирования. Описываются приложения данных гиперспектрального аэрозондирования для прогнозирования возможной опасности от продуктов горения.

Демонстрируются примеры модельных расчетов распространения фронта лесного пожара и характерные спектры разных объектов: водоемов при задымлении от пожаров, различных типов зеленой и пожелтевшей растительности, гарей и др. Показаны перспективы использования данных гиперспектрального аэрозондирования для распознавания перечисленных объектов.

В работе [2] проводится теоретическое исследование возникновения и распространения лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов. С помощью метода математического моделирования получены распределения температуры и концентрации продуктов пиролиза и горения с течением времени, на основании которых изучаются предельные условия распространения верховых лесных пожаров для различных условий.

В работе [14] проводилась разработка математических моделей, которые описывают распространение лесных пожаров. Эти модели имеют огромное прикладное значение. Применять такие модели можно для автоматизированных командных пунктов, создаваемых для борьбы с лесными пожарами. Накопленные наблюдения к настоящему времени дают возможность построить так называемые феноменологические (формальные) модели, необходимые для прогнозирования лесного пожара.

В работе [15] рассмотрена модель лесных пожаров в криволинейной трехмерной системе координат с учетом рельефа. Построен и распараллелен алгоритм для решения задач подобного класса, не требующий ручной дискретизации уравнений.

В статье [16] применительно к условиям России представлен метод и результаты канадской прогнозной модели динамики природных пожаров CFFBPS. Оптимизация модели выполнена на основе использования репрезентативной выборки реальных пожаров на территории России. О ежедневной динамике пожаров реальная информация была получена в результате обработки данных спутникового радиометра MODIS. Оценка точности результатов моделирования выполнялась для выборки, включавшей более 40000 пожаров, действовавших на территории России в период 2007-2011 годов, на основе сравнительного критерия близости модельной и фактической динамики развития пожаров. В результате оптимизации были получены значения параметров модели, позволившие существенно повысить точность моделирования динамики пожаров. Оптимизированная модель была положена в основу разработки в составе Информационной системы дистанционного

мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз) блока прогноза динамики очагов горения, обеспечивающего возможность интерактивной модификации ряда ключевых параметров пожаров и моделирование их развития с использованием web-интерфейса.

Работе [17] посвящена проблеме возникновения верхового лесного пожара за счет зажигания полога леса от очага низового пожара. Представлена математическая модель и результаты численных расчетов. Для постановки данной задачи была взята за основу общая математическая модель пожаров, которая учитывает особенности лесов (запас лесных горючих материалов, влагосодержание, высоту и породу деревьев и т.п.) и метеорологические условия (скорость ветра, температура окружающей среды и т. п.). Процесс перехода низового в верховой лесной пожар рассматривается многостадийный, включает в себя инертный прогрев, сушку, пиролиз и зажигание. Разработка программы для расчета зажигания полога леса от очага низового лесного пожара. Математическая модель, представленная в работе, может быть применена для прогнозирования возникновения верховых лесных пожаров на основе данных о метеорологических условиях и характеристиках леса, а также для оценки критических условий воспламенения полога лесного массива.

## **1.2 Моделирование процессов теплообмена в области фронта лесного пожара**

Для моделирования лесных пожаров используют различные математические модели. В работе [18] представлена классификация существующих математических моделей лесных пожаров:

1. Модель прогноза динамики распространения лесного пожара.
2. Модель прогноза геометрических параметров лесного пожара.
3. Модель прогноза параметров течения, тепло- и массопереноса в зоне пожара и на его фронте.



4. Общие математические модели, которые дают возможность спрогнозировать различные характеристики лесного пожара, как на его фронте, так и непосредственно в зоне пожара.

Модели лесных пожаров также можно классифицировать с точки зрения методологии построения. Однако данная классификация условна и состоит из следующих групп [19-20]: 1. Модели, которые описывают физические механизмы составляющих пожар процессов для получения интересующих параметров пожара, базирующиеся на физике горения. Все необходимые константы вычисляются на основе исходной теории. Модели не используют экспериментальных данных. 2. Интерполяционные модели, используют экспериментальные данные, полученные при реальных пожарах, для определения статистических зависимостей между входными и выходными характеристиками модели пожара. Эти модели не учитывают физические процессы рассматриваемого пожара. Точность применения таких моделей в прогнозировании распространения пожара ограничена подобием условий, при которых происходили реальные пожары. 3. Экспериментально-аналитические модели, комбинируют физическую теорию со статистическими методами для вывода зависимостей, описывающих развитие пожара. Неизвестные параметры (константы) определяются экспериментально.

Теория подобия - это учение об условиях подобия физических явлений, процессов и систем, которое опирается на учение о размерностях физических величин и положено в основу экспериментов с физическими моделями

М. В. Кирпичев (1879-1955 гг.) автор теории физического моделирования процессов теплопередачи и тепловых устройств. Его работы и теория подобия стали толчком для применения методов физического моделирования при изучении закономерностей динамики пожаров.

Рассмотрим теперь другой пример. Во многих моделях пожаров применяют дифференциальные уравнения движения газа или вязкой жидкости, которые математически выражают законы сохранения импульса и массы, которые называют также уравнениями Навье-Стокса. К данным уравнениям

добавляют уравнение связывающие между собой давление, плотность и температуру, и уравнение энергии – уравнение состояния и используют для исследования сжимаемых течений. [21].

В работе [22] предлагают модель распространения огня в лесу с использованием гиперболических уравнений реакции-диффузии. Детально проанализированы динамические и термодинамические аспекты модели

В работе [23] использована общая математическая модель лесных пожаров. В данной модели лес представлен как многоярусная многофазная пространственно-неоднородная пористо-дисперсная среда. Основную систему уравнений представляют закон сохранения массы газодисперсной фазы; закон сохранения количества движения газодисперсной фазы в проекциях на оси декартовой системы координат; закон сохранения энергии в газодисперсном потоке; закон сохранения и изменения массы отдельных компонентов в газодисперсном потоке; закон сохранения энергии в конденсированной фазе; уравнения кинетики пиролиза и сушки ЛГМ; уравнения баланса массы коксика и пепла и ряд других соотношений.

В работе [24] рассмотрены основные методы математических исследований вероятности возникновения лесных пожаров. Выяснено, что научные исследования, связанные с математическим моделированием вероятности возникновения пожаров с учетом грозовой активности и антропогенного фактора, имеют преимущественно прикладное значение и направлены на обеспечение пожарной безопасности лесов и ликвидацию ландшафтных пожаров. Рассмотрено построение математической модели и методика решения задачи оптимизации системы обеспечения пожарной безопасности с использованием имитационного моделирования.

В работе [25] проведен анализ условий зажигания сфокусированным потоком солнечного излучения слоя лесного горючего материала. Сценарий моделирования соответствует возникновению очага лесного пожара в результате воздействия на слой лесного горючего материала (ЛГМ) сфокусированного потока солнечного излучения. Проведены сценарные

расчеты с учетом различной интенсивности излучения. Представлены рекомендации по дальнейшему развитию этой компоненты детерминированной модели.

Таким образом, вероятность распространения скорости пожара рассчитываются по экспериментальным зависимостям. Применяют сложные модели, для которых необходимо решить уравнения Ренольдса для турбулентного течения, которые моделируют теплообменные процессы в зоне пожара. На этих моделях можно построить как возникновение, распространение пожара, так и переход из низового пожара в верховой.

Для каждой математической модели авторы находят наиболее подходящие, по их мнению, методы отвечающие условию экономичности для расчета и которые наиболее точно реализуют их процесс.

### **1.3 Численные методы**

В работе [26] предложена вычислительная технология моделирования процесса распространения лесного пожара на основе параллельных алгоритмов, использующая математическую модель данного процесса и геометрическую декомпозицию расчётной области. Описаны идентификация параметров модели и программная реализация алгоритмов на кластерной системе ИВМ СО РАН (г. Красноярск). Исследовано влияние величины зоны перекрытия между расчётными подобластями. Исследован эффект масштабирования и ускорения вычислений при различных способах декомпозиции расчётной области с учётом согласования результатов на границах расчётных подобластей.

В работе [27] на основе модифицированной модели Р. Ротермела представлена задача моделирования случайного поля скорости распространения кромки пожара по неоднородному слою лесного горючего материала. По авторегрессионной схеме было проведено численное моделирование поля. Каждый из необходимых характеристик, которые характеризуют теплофизические свойства лесных горючих материалов (запас

ЛГМ, глубина, влагосодержание, теплотворная способность материала), составляет отдельное случайное поле на плоскости с заданными параметрами.

В работе [28] представлена компьютерная система поддержки принятия решений для управления борьбой с лесными пожарами: расчета областей достижимости, составление траекторий оптимальной локализации лесного пожара, расчета оптимальных маршрутов доставки противопожарных сил и средств с учетом рельефа местности и визуализация результатов на трехмерной сцене.

В работе [29] приведена трехмерная постановка и методика численного решения задачи о зажигании полога леса от очага низового лесного пожара. Использован метод контрольного объема для приведения к дискретной форме системы дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. С использованием численного метода, решаются сеточные уравнения, которые возникли в результате дискретизации. В результате исследования получены распределения векторных полей скорости, поверхностей равных температур, а также концентраций газообразных продуктов пиролиза и кислорода и объемных долей фаз в окрестности очага зажигания.

В работе [30] рассматриваются вопросы, связанные с моделированием пожаров. Отмечены особенности распространения лесных пожаров. Выделены основные характеристики, влияющие на скорость распространения огня. Перечислены некоторые программные продукты, позволяющие проводить оценку распространения пожара. Отмечена роль систем связи в оповещении о пожаре.

В работе [31] рассматриваются методы обратных задач динамики для подходов синтеза оптимального управления тушением лесного пожара. Данный метод представляет достоверную динамическую модель развития лесного пожара. Использовалась математическая модель, выходной координатой которой является площадь пожара, а управлением - темпы создания заградительной полосы. Область применения результатов данного

исследования - оценка пожарной обстановки, рекомендации для привлечения и сосредоточения необходимых сил и средств для ликвидации пожара.

В работе [32] излагаются результаты численного моделирования динамики распространения лесного пожара на местности заданной геометрии, равномерно покрытой лесной растительностью, под воздействием внешнего поля скоростей. Предложен подход к численному моделированию данной задачи на основе модификации метода крупных частиц на разнесенной сетке и коррекции скоростей химических реакций с учетом расхода вещества за время расчетного шага. Проведен анализ полученных результатов и их сопоставление с известными экспериментальными и теоретическими данными.

Целью работы [33] является получение численного и аналитического решения задачи о распространении низового пожара с учетом влияния угла наклона подстилающей поверхности. Результаты, полученные для ровной поверхности, согласуются с известными данными, как теоретическими, так и экспериментальными.

В работе [34] представлена модель лесного пожара, с учетом фрактального характера фронта горения. Найдены аналитические зависимости скорости распространения лесного пожара и размеров сгоревшего участка от фрактальной размерности, времени и параметров лесного массива. Составлена и реализована программа по вычислению фрактальной размерности лесных массивов по данным аэрофотосъемки.

Как видно из анализа литературных источников наиболее важными проблемами в данной области является зарождение пожара, переход медленного низового пожара в быстро распространяющийся верховой и непосредственно распространение фронта лесного пожара. Все эти задачи чрезвычайно важны для практики и нами было решено посвятить работу прогнозированию скорости распространения лесного пожара, что непосредственно связано с анализом гидродинамики в области фронта лесного пожар, что дает нам возможность учесть тепломассообменные процессы при стационарном процессе распространения этого фронта. Ярким представителем,

решающим задачу распространения лесного пожара является А.А. Кулешов. В его работах [35,36] рассматриваются двумерные математические модели лесных пожаров, построенные на основе уравнений динамики гетерогенных многофазных сред методом осреднения представленных трехмерных уравнений по высоте слоя горючих материалов, а также для многофазных моделей лесных пожаров описан алгоритм и численные методы решения задачи. На тестовых примерах показаны результаты численного моделирования лесных пожаров по двухфазной и трехфазной моделям.

### **3 Численная реализация математической модели**

#### **3.1 Особенности реализации математической модели**

При анализе научных статей, каждый автор выбирает свой метод реализации математической модели, который считается для них наиболее подходящим. В основном данный метод записан в потоках и предполагает решение методом контрольного объема, или как его еще называют метод конечных разностей.

Идея метода конечных разностей заключается в следующем вместо производных в дифференциальном уравнении используются их конечноразностные аппроксимации [40].

Основные особенности получающейся системы алгебраических уравнений определяются типом исходного уравнения в частных производных (или системы уравнений в частных производных).

Любая разновидность данного метода может быть представлена в виде 3 базовых этапов:

1. Дискретизация пространства и построение расчетной сетки. Суть этапа заключается в переходе от непрерывного пространства, для которого решается задача к дискретному.

2. Получение системы алгебраических уравнений, отражающих соотношение между значениями искомой функции в точках дискретного пространства.

3. Решение полученной системы алгебраических уравнений. Относительно неизвестных значений искомой функции в точках дискретного пространства. [40]

В данной работе, поскольку, есть потоки и параметры в объеме, используется метод для сжимаемой невязкой жидкости, разработанный К.С. Годуновым.

### 3.2 Выбор численного метода расчета (Метод К.С. Годунова)

Интегрирование системы (2.1.1) - (2.1.11) проводилось по схеме, основанной на методе контрольного объема [41], в которой на первом этапе, для определения газодинамических составляющих потоков, использовалась схема произвольного разрыва С.К. Годунова [42, 43].

Схема С.К. Годунова консервативная численная схема для решения дифференциальных уравнений. В этом методе, консервативные переменные рассматриваются, как части постоянных на концах ячейки на каждом шаге по времени и нужно найти решение в задаче Римана между границами. Потоки сопрягаются с поверхностью, где скачком происходят изменения параметров газа.

Значения давления, плотности и нормальной скорости на поверхности определяются из решения задачи распада произвольного разрыва. Входными данными для решения этой задачи являются осредненные параметры в ячейке – для "классического" метода С.К. Годунова это значения в соседних ячейках разностной сетки. Основными искомыми величинами в задаче распада произвольного разрыва являются давление, плотность и нормальная скорость.

Определение параметров при распаде произвольного разрыва базируется на динамических соотношениях для ударной волны (сильный разрыв),двигающейся со скоростью  $D$ :

$$[\rho]D - [\rho u] = 0 ,$$

$$[\rho u]D - [p + \rho u^2] = 0 ,$$

$$\left[ \rho \left( \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \right] D - \left[ \rho u \left( \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) + pu \right] = 0$$



В случае волны разрежения пользуются условиями непрерывности римановых инвариантов:

$$[u] \pm \frac{2}{\gamma - 1} [c] = 0, [\sigma(S)] = 0.$$

Квадратными скобками обозначается разность постоянных значений соответствующих величин в областях, примыкающих к волне разрежения слева и справа.

С учетом вышесказанного основные параметры для распространяющихся волн вправо и влево относительно границы между рассматриваемыми ячейками отвечают следующим соотношениям:

Левые волны

Правые волны

Ударные волны

$$U - u_I + \frac{P - p_I}{a_I} = 0$$

$$R = \varrho_I \frac{(\gamma + 1)P + (\gamma - 1)p_I}{(\gamma - 1)P + (\gamma + 1)p_I}$$

$$D_I = u_I - \frac{a_I}{\varrho_I}$$

$$a_I = \sqrt{\varrho_I \left[ \frac{\gamma + 1}{2} P + \frac{\gamma - 1}{2} p_I \right]}$$

$$U - u_{II} - \frac{P - p_{II}}{a_{II}} = 0,$$

$$R = \varrho_{II} \frac{(\gamma + 1)P + (\gamma - 1)p_{II}}{(\gamma - 1)P + (\gamma + 1)p_{II}},$$

$$D_{II} = u_{II} + \frac{a_{II}}{\varrho_{II}},$$

$$a_{II} = \sqrt{\varrho_{II} \left[ \frac{\gamma + 1}{2} P + \frac{\gamma - 1}{2} p_{II} \right]}$$

Левые волны

Правые волны

Волны разрежения

$$U - u_I - \frac{2c_I}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P}{p_I} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} \right] = 0,$$

$$U - u_{II} + \frac{2c_{II}}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P}{p_{II}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} \right] = 0,$$

$$\begin{aligned}
R &= \gamma \frac{P}{(c_I^*)^2} \text{ or } \frac{P}{R^\gamma} = \frac{p_I}{\rho_I^\gamma}, & R &= \gamma \frac{P}{(c_{II}^*)^2} \text{ or } \frac{P}{R^\gamma} = \frac{p_{II}}{\rho_{II}^\gamma}, \\
a_I &= \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \rho_I c_I \frac{1 - P/p_I}{1 - (P/p_I)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}}, & a_{II} &= \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \rho_{II} c_{II} \frac{1 - P/p_{II}}{1 - (P/p_{II})^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}}, \\
D_I &= u_I - c_I, D_I^* = U - c_I^*, & D_{II} &= u_{II} + c_{II}, D_{II}^* = U + c_{II}^*, \\
c_I &= \sqrt{\gamma \frac{p_I}{\rho_I}}, c_I^* = c_I + \frac{\gamma - 1}{2} (u_I - U) & c_{II} &= \sqrt{\gamma \frac{p_{II}}{\rho_{II}}}, c_{II}^* = c_{II} - \frac{\gamma - 1}{2} (u_{II} - U)
\end{aligned}$$

$P, U$  – давление в зоне контактного разрыва (постоянные при переходе через контактный разрыв);

$R$  – плотность в зоне контактного разрыва (изменяется скачком при переходе через контактный разрыв);

$D_{\text{index}}$  – скорости ударной волны или крайних характеристик волн разрежения;

$a$  – массовая скорость газа.

Для определенности рассматривается случай  $p_I < p_{II}$ . Методом итерации подбирается давление на контактом разрыве, удовлетворяющее уравнению:

$$F(P) = f(P, p_I, \rho_I) + f(P, p_{II}, \rho_{II}) = u_I - u_{II},$$

где

$$f(P, p_k, \rho_k) = \begin{cases} \frac{P - p_k}{\rho_k c_k \sqrt{\left[ \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \pi_k + \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \right]}}, & \text{если } P \geq p_k, \\ \frac{2c_k}{\gamma - 1} \left[ \pi_k^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right], & \text{если } P < p_k, \end{cases}$$

$$\pi_k = P/p_k, c_k = \sqrt{\gamma p_k / \rho_k}.$$

Функция  $F(P)$  монотонна и процесс нахождения  $P$  хорошо демонстрирует диаграмма на рисунке 3.1. Искомое значение давления на контактом разрыве

ищется итеративным способом до удовлетворения точности нахождения функции  $F(P)$  относительно разности скоростей  $u_I - u_{II}$ , либо когда интервал значений давления, внутри которого располагается значение давление на контактном разрыве меньше заданной точности. В предлагаемом программном комплексе используются процедура распада произвольного разрыва, в которой точность нахождения значения безразмерного давления контактного разрыва составляет  $10^{-8}$ .

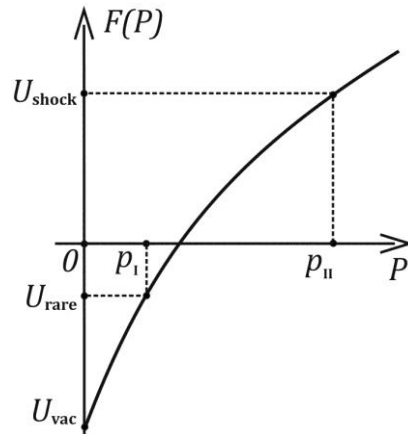


Рисунок 3.1 - Процесс определения давления н контактном разрыве

Значения представленных на рисунке характерных величин:

$$U_{уд} = \frac{p_{II} - p_I}{\sqrt{q_I \left[ \frac{\gamma + 1}{2} p_{II} + \frac{\gamma - 1}{2} p_I \right]}} = F(p_{II}),$$

$$U_{раз} = -\frac{2c_{II}}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_I}{p_{II}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} \right] = F(p_I),$$

$$U_{вак} = -\frac{2(c_I + c_{II})}{\gamma - 1} = F(0)$$

определяют конфигурацию волн при распаде произвольного разрыва согласно следующим соотношениям:

Соотношения	Конфигурация волн
$u_I - u_{II} > U_{уд}$	Влево и вправо распространяются ударные волны
$U_{раз} < u_I - u_{II} < U_{уд}$	Влево распространяется волна разрежения, а вправо – ударная волна
$U_{вак} < u_I - u_{II} < U_{раз}$	Влево и вправо распространяются волны разрежения
$u_I - u_{II} < U_{вак}$	Влево и вправо распространяются волны разрежения, между которыми располагается зона вакуума

Схематически картина возникающего течения на плоскости изображается одной из возможных конфигураций, изображенных на рисунке 3.2.[42]

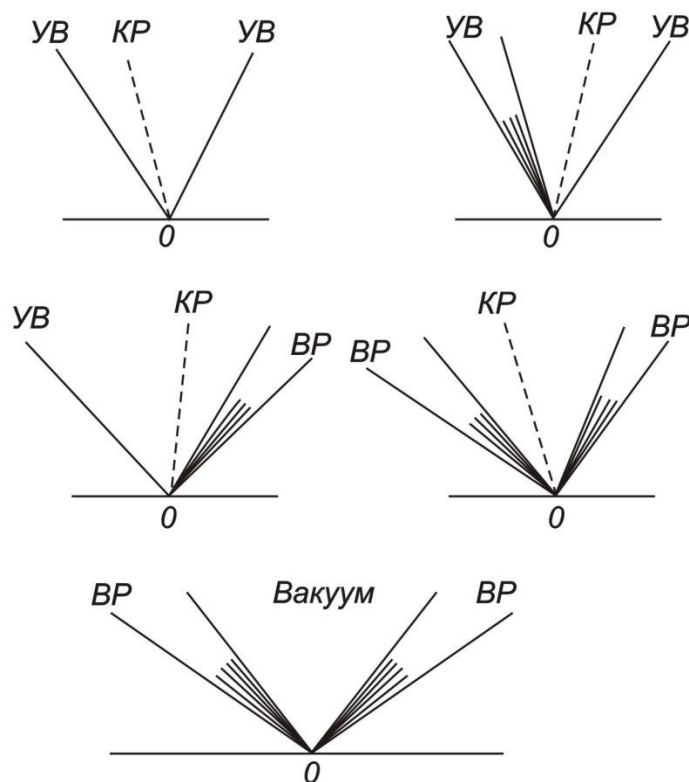


Рисунок 3.2- Схемы возможных волновых конфигураций

Схема С.К. Годунова имеет ряд преимуществ. Данная схема монотонна – это значит, что переходя через скачки, которые могут появляться, она нормально на них реагирует, и не дает осцилляций. Возможные скачки при решении такой задачи с помощью метода С.К. Годунова включены внутрь, то есть, нет необходимости выделять какой-либо параметр, он позволяет считать как метод сквозного счета, не задумываясь над тем, какое там может быть течение, какие скачки параметров. Это возможно, так как данный метод основан на характеристиках и законах сохранения энергии. Особенно это важно в таких задачах, где много различных эффектов, таких как горение, трение, теплообмен, диффузия.

В данной работе взят за основу такой метод счета газодинамики, так как в дальнейшем планируется применить его для исследования вязкого течения. Поскольку превалируют эффекты газодинамики, решается вопрос о применении метод газодинамики для моделирования параметров гидродинамике в очаге лесного пожара. Моделирование течения проводится там, где имеются воздушные потоки, которые являются следствием, во-первых, ветра, но прежде всего наличием источника высокой температуры, которая дает нагрев. При моделировании в ячейках задавалась высокая температура, с тем чтобы посмотреть каким образом эта высокая температура позволяет разгоняться потоку.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела работы является технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ (НИР). Оно проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию НИР, а также уровня научно-технической результативности НИР.

В рамках данной работы НИР включают в себя создание математической модели для моделирования процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара и определение характеристик, определяющих скорость и направление распространения фронта лесного пожара посредством программного комплекса. При выполнении численного исследования использовались программный комплекс Delphi 7. На основе НИР оформлена диссертационная работа в пакете программ Microsoft Office.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи [44]:

- Оценка инновационного потенциала
- Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление план-графика
- Составление сметы затрат
- Расчет нарастания технической готовности и целесообразности НТИ

Первоначально производится организация и планирование работ, куда включается определение этапов работы и их трудоемкости.

### **5.1 Оценка инновационного потенциала НИР**

Лесные пожары относятся к числу стихийных бедствий, наносящих значительные материальные и экологические потери. В результате

неосторожного обращения с огнем возникает около 90% лесных пожаров, а до 10% от погодных условий (сухи гроз). Наносят большой ущерб лесному хозяйству: уничтожается много древесины, уменьшается прирост деревьев, ухудшается состав лесов, усиливаются буреломы и ветровалы.

В связи с этим, проводится много научных исследований по возникновению, развитию и распространению лесных пожаров.

Для более эффективной борьбы с лесными пожарами необходимо решать две задачи: 1) анализ причин пожароопасных состояний лесов, с тем чтобы не допускать возникновения возгораний; 2) определить с какой скоростью и в каком направлении будет двигаться фронт пожара, для оптимального выбора тактики борьбы с ним. Данное исследование сосредоточено на решение второй задачи.

В данной работе проведено численное исследование процессов тепломассобмена в области фронта лесного пожара и определение характеристик, определяющих скорость и направление распространения фронта лесного пожара. Создан вычислительный комплекс для моделирования данных процессов.

## **5.2 Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика**

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

На начальном этапе составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ, продолжительность выполнения этих работ и сведем их в

таблицу 5.2.1. Основные исполнители в проекте: инженер (И) и научный руководитель (НР).

Таблица 5.2.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Формулирование задачи	НР	100%
Составление технического задания на проект	НР	90%
	И	10%
Поиск и изучение литературы	НР	20%
	И	80%
Разработка календарного плана	НР	80%
	И	20%
Разработка общего алгоритма программного комплекса	НР	30%
	И	70%
Реализация алгоритма в среде программирования	НР	5%
	И	95%
Отладка полученного программного комплекса	И	100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	100%
Подведение итогов – сравнение полученных результатов с желаемыми	НР	40%
	И	60%

Перейдем к расчету продолжительности этапов работ, который осуществляется опытно-статистическим методом, который реализуется вероятностным способом. Для определения ожидаемого значения



продолжительности работ  $t_{ож}$  и других величин воспользуемся следующими формулами (5.2.1 – 5.2.4)[44].

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (5.2.1)$$

где  $t_{min}$  – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

$t_{max}$  – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях,  $T_{рд}$  ведется по формуле

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д}, \quad (5.2.2)$$

где  $t_{ож}$  – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{вн}$  – коэффициент выполнения работ ( $K_{вн} = 1$ );

$K_{д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ( $K_{д} = 1,2$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях,  $T_{кд}$  ведется по формуле

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к}, \quad (5.2.3)$$

где  $T_{к}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности,  $T_{к}$  рассчитывается по формуле:

$$T_{к} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (5.2.4)$$

где  $T_{кал}$  – календарные дни ( $T_{кал} = 365$ );

$T_{вд}$  – выходные дни ( $T_{вд} = 52$ );

$T_{\text{пд}}$  – праздничные дни ( $T_{\text{пд}} = 12$ ).

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 52 - 12} = 1,213$$

В таблице (5.2.2) приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе. На основании таблицы (5.2.1) составим линейный график работ и представим его на рисунке (5.2.1).

Таблица 5.2.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					ТРД		ТКД	
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{ож}}$	НР	И	НР	И
Формулирование задачи	НР	2	4	2,8	3,36	–	4,08	–
Составление технического задания на проект	НР, И	2	3	2,4	2,59	0,29	3,14	0,35
Поиск и изучение литературы	НР, И	12	15	13,2	3,17	12,67	3,84	15,37
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	2,69	0,67	3,26	0,82
Разработка алгоритма в программном комплексе	НР, И	8	15	10,8	3,89	9,07	4,72	11,00
Реализация алгоритма в программном комплексе	НР, И	18	25	20,8	1,25	23,71	1,51	28,76
Анализ результатов численного исследования	И	15	20	17	–	20,40	–	24,75
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	10	15	12	–	14,40	–	17,47
Подведение итогов	НР, И	4	7	5,2	2,50	3,74	3,03	4,54
Итого:				87	19,44	84,96	23,58	103,06

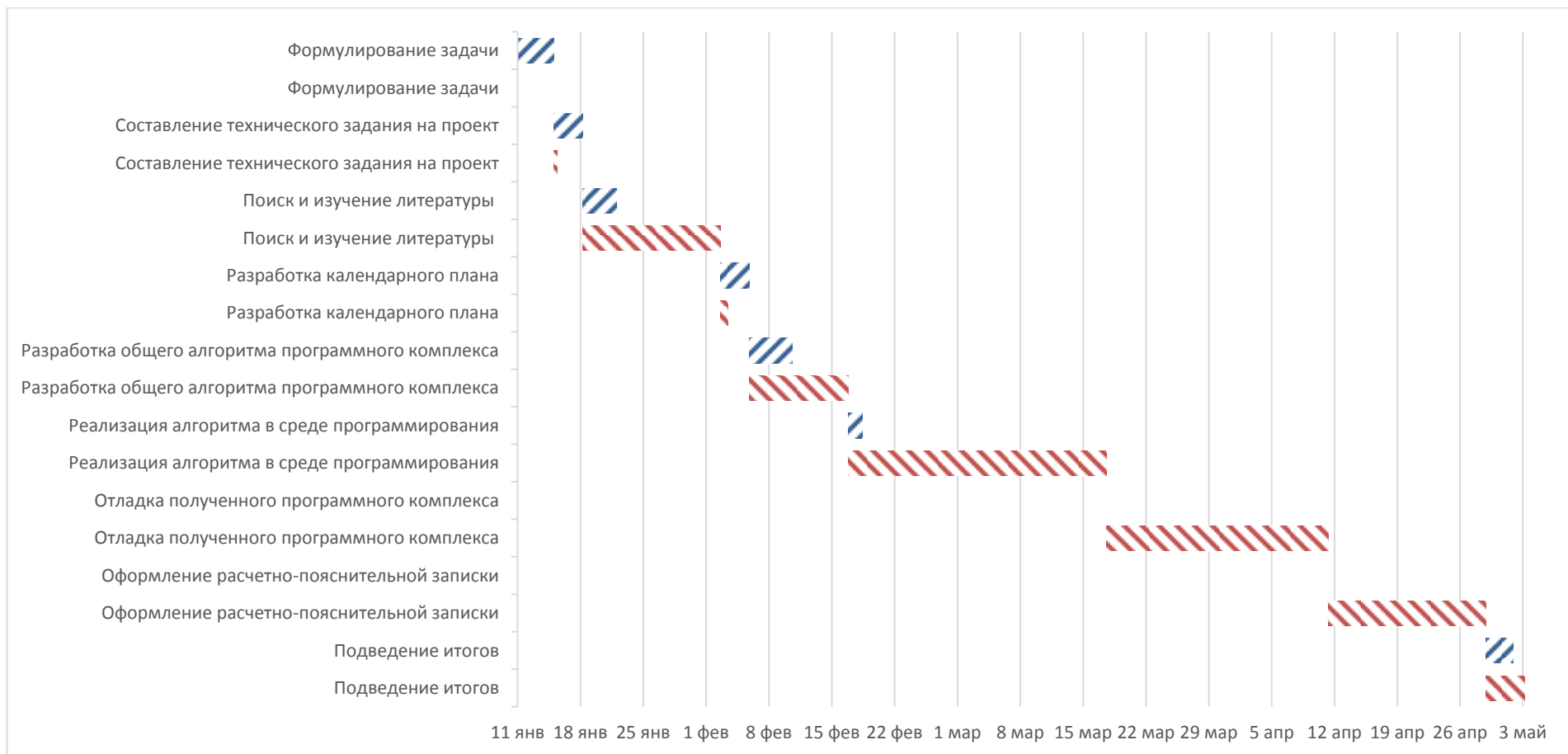


Рисунок 5.2.1 - Линейный график работ на основе рассчитанного для инженера и научного руководителя времени ТКД

### 5.3 Составление сметы затрат

Оценим затраты на материалы. К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по средней рыночной стоимости на 2016 год по соответствующим ценникам и приведена в таблице (5.3.1).

Таблица 5.3.1 – Расходные материалы [45], [46], [47]

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Компьютер	25499	1	25499
Клавиатура	510	1	510
Мышка	390	1	390
Принтер	4990	1	4990
Офисная мебель			
Стол	2500	1	2500
Стул	900	1	900
Программное обеспечение			
Delphi 7	4396	1	4396
Microsoft Office 2010	10599	1	10599
Итого:	49 784		

Расходы на материалы составили  $C_{\text{мат}} = 49\,784$  руб.

Следующей статьей расходов НИР для оценки является заработная плата исполнителей. Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Дневная з. пл} = \frac{\text{Месячный оклад}}{25,08 \text{ дней}}, \quad (5.3.1)$$

Расчет затрат на основную заработную плату приведен в таблице 5.3.2.

Таблица 5.3.2 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	К	Фонд з/платы, руб.
НР	33 162,87	1 322,28	24	1,4	44 429
И	14 874,45	593,08	104	1,4	86 352
Итого:			130 781		

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили  $Z_{\text{осн}} = 130\,781$  руб. При расчете учитывалось, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце 25,08 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы (5.2.2). Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям  $K_{\text{пр}} = 0,1$  и районный коэффициент  $K_{\text{рк}} = 0,3$ . Итоговый коэффициент ( $K = 1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{рк}} = 1 + 0,1 + 0,3 = 1,4$ ).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [44], используемые формулы (5.3.2 – 5.3.12) взяты [44]

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,15 \cdot ЗП_{\text{осн}}, \quad (5.3.2)$$

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 130\,781 = 19\,617,15 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы:

$$\Phi ЗП = ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}}, \quad (5.3.3)$$

$$\Phi ЗП = 130\,781 + 19\,617,15 = 150\,398,15 \text{ руб}$$

Расчет отчислений от фонда оплаты труда

Затраты по этой статье составляют отчисления по отчислению на социальные нужды.

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$С_{\text{соц}} = К_{\text{соц}} \cdot \Phi ЗП, \quad (5.3.4)$$

где  $К_{\text{соц}}$  – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 27% от затрат на заработную плату.

$$С_{\text{соц}} = 0,27 \cdot 150\,398,15 = 40\,607,5 \text{ руб.}$$

Перейдем к расчету затрат на электроэнергию. Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей  $Э_{\text{об}}$  рассчитываются по формуле

$$Э_{\text{об}} = P_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}} \cdot t_{\text{об}}, \quad (5.3.5)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$  – тарифная цена за 1 кВт·час, принимаем  $Ц_{\text{э}} = 2,15 \text{ руб/кВт} \cdot \text{час}$ ;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования вычисляется на основе данных для  $T_{РД}$  таблицы 5.2.2 для инженера из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов

$$t_{ОБ} = T_{РД} \cdot 8, \quad (5.3.6)$$

$$t_{ОБ} = 85 \cdot 8 = 680 \text{ час.}$$

Мощность, потребляемая оборудованием  $P_{ОБ}$ , принимаем равную мощности блока питания компьютера и монитора

$$P_{ОБ} = P_{БП} + P_{М}, \quad (5.3.7)$$

$$P_{ОБ} = 0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ кВт},$$

$$\mathcal{E}_{ОБ} = 0,5 \cdot 2,15 \cdot 680 = 731 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта  $\mathcal{E}_{ОС}$ , рассчитываются по формуле

$$\mathcal{E}_{ОС} = P_{ОС} \cdot \text{Цэ} \cdot t_{ОС}, \quad (5.3.8)$$

где  $P_{ОС}$  – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт;

$t_{ОС}$  – время работы осветительных приборов, час.

Мощность, потребляемая освещением  $P_{ОС}$ , определяется по формуле

$$P_{ОС} = P_{УСТ.ОС} \cdot K_C, \quad (5.3.9)$$

где  $P_{УСТ.ОС}$  – установленная мощность осветительных приборов,

принимаем  $P_{УСТ.ОС} = 1,28 \text{ кВт}$ ;

$K_C$  – коэффициент спроса для внутреннего освещения, принимаем  $K_C = 0,9$ .

$$P_{ОС} = 1,28 \cdot 0,9 = 1,15 \text{ кВт.}$$

Время работы освещения  $t_{ОС}$ , час, определяется по формуле



$$t_{OC} = t_{СУТ} \cdot T, \quad (5.3.10)$$

где  $t_{СУТ}$  – длительность работы освещения за смену, час;

$T$  – время, затраченное на проведение работ,

принимая  $T = 85$  дней.

$$t_{OC} = 5 \cdot 85 = 425 \text{ час},$$

$$\mathcal{E}_{OC} = 1,15 \cdot 2,15 \cdot 425 = 1\,050,81 \text{ руб.}$$

Общие затраты на электроэнергию  $\mathcal{E}$ , руб, определяются по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{OB} + \mathcal{E}_{OC}, \quad (5.3.11)$$

$$\mathcal{E} = 731 + 1\,050,81 = 1\,781,81 \text{ руб.}$$

Следующим этапом расчёта затрат является расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB}}{F_D} \cdot t_{BT}, \quad (5.3.12)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации,

принимая  $N_A = 25\%$ ;

$C_{OB}$  – цена оборудования,

исходя из таблицы 5.3.1. принимаем  $C_{OB} = 25499$  руб.;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени,

принимая  $F_D = 2416$  часов;

$t_{BT}$  – время работы вычислительной техники при создании программного продукта, по таблице 10  $t_{BT} = 104 \cdot 8 = 832$  час.;

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 25499}{2416} \cdot 832 = 2\,195,28 \text{ руб.}$$

Для оценки не учтённых в предыдущих статьях расходов рассчитаем прочие расходы [44].

Прочие расходы составляют 16 % от единовременных затрат на выполнение технического продукта и проводятся по формуле:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ОСН}} + C_{\text{СОЦ}} + Э + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,16, \quad (5.3.13)$$

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (49784 + 130781 + 40607,5 + 1781,81 + 2195,28) \cdot 0,16 = \\ = 36\,023,93 \text{ руб.}$$

Определим общую себестоимость НИР путем сведения рассчитанных статей расчета в смету (таблица 5.3.3).

Таблица 5.3.3 – Смета затрат на НИР

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1	2	3
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	49 784
Фонд оплаты труда	$C_{\text{ОСН}}$	130 781
Отчисления из ФОТ	$C_{\text{СОЦ}}$	40 607,5
Расходы на электроэнергию	Э	1 781,81
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	2 195,28
Работы, выполняемые сторонними организациями	$C_{\text{СТОП}}$	–
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	36 745,85
Итого:		261 895,44

Таким образом, расходы на НИР составили:  $C = 261\,895,44$  руб.

## 5.4 Расчет нарастания технической готовности работ

Следующим этапом является расчет нарастания технической готовности работ. Величина нарастания технической готовности работы  $H_i$  показывает на сколько процентов выполнена работа на каждом этапе. Данная величина вычисляется по формуле (5.4.1) [44]:

$$H_i = \frac{t_{Hi}}{t_0} \cdot 100\%, \quad (5.4.1)$$

где  $t_{Hi}$  - нарастающая трудоемкость с момента начала работы  $i$ -го этапа;  
 $t_0$  - общая трудоемкость.

Общая трудоемкость  $t_0$ , вычисляется по формуле (4.4.2) [44]:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_{ож_i}, \quad (5.4.2)$$

где  $t_{ож_i}$  - ожидаемая продолжительность  $i$ -го этапа.

Удельный вес каждого этапа  $Y_i$  определяется по формуле (5.4.3) [44]:

$$Y_i = \frac{t_{ож_i}}{t_0} \cdot 100\%. \quad (5.4.3)$$

Результаты вычислений  $H_i$  и  $Y_i$  отражены в таблице 5.4.1.

Таблица 5.4.1 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

	Этап	$H_i$ , %	$Y_i$ , %
1	Формулирование задачи	3,22	3,22
2	Составление технического задания на проект	5,98	2,76
3	Поиск и изучение литературы	21,15	15,17
4	Разработка календарного плана	24,37	3,22
5	Разработка общего алгоритма программного комплекса	36,78	12,41

Окончание таблицы 5.4.1

	Этап	Н <sub>і</sub> , %	У <sub>і</sub> , %
6	Реализация алгоритма в программном комплексе	60,69	23,91
7	Анализ полученных результатов численного исследования	80,23	19,54
8	Оформление расчетно-пояснительной записки	94,02	13,79
9	Подведение итогов	100,00	100,00

Таким образом, мы видим процесс нарастания технической готовности вплоть до полного выполнения с течением времени по ходу последовательного выполнения определенных этапов

В данном разделе работы определены этапы и трудоемкость работ, составлены план-график и смета затрат, произведен расчет нарастания технической готовности программного комплекса. Программный комплекс завершен на 100% и готов к использованию.

Согласно смете затрат, расходы на НИР составили  $C = 261\,895,44$  руб.

Данный проект является экономически эффективным, так как при затратах около трехсот тысяч рублей позволяет спрогнозировать распространение пожара, скорость и направление пожара, и тем самым в короткие сроки выбрать оптимальную тактику борьбы с ним, чтобы предотвратить экологические и экономические потери. Исходя из этого видно, что затраты на численное исследование процессов теплообмена в области фронта лесного пожара и определение характеристик, определяющих скорость и направление распространения фронта лесного пожара

Исходя из этого видно, что затраты на разработку математической модели, позволяющей смоделировать процессы теплообмена в области фронта лесного пожара, незначительны по сравнению с возможными расходами необходимыми на восстановление лесного массива.

## Список публикаций

1. Бондарчук С.С., Борисов Б.В., Плюта Н.С. Численное исследование гидродинамики потоков в области фронта лесного пожара // Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск: НИТПУ. – 2015.